

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ НИЗКОКАЛОРИЙНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Аннотация

Приведено описание экспериментального стенда, предназначенного для изучения физико-химических характеристик процесса горения горючих газовых смесей, аналогичных по составу побочным продуктам металлургического производства (доменный газ, коксовый газ, ферросплавный газ, конвертерный газ). Проведено численное моделирование рабочего участка экспериментального стенда в CFD-пакете. Проведен анализ результатов численного моделирования.

Ключевые слова. Моделирование в CFD-пакете, сжигание доменного газа, экспериментальный стенд, утилизация доменного газа, диффузионный факел.

Abstract

Description of experimental stand intended for investigation of physical and chemical characteristics of combustion process of the burning gas mixtures similar on composition to by-products of metallurgical production (blast furnace gas, coke oven gas, ferroalloy gas, converter gas) is provided. Numerical modeling of a working site of the experimental stand in a CFD is provided. The analysis of results of numerical modeling is provided.

Keywords. CFD modeling, blast furnace gas combustion, experimental stand, blast furnace gas utilization, diffusion flame.

Введение

В настоящее время в отечественных металлургических предприятиях утилизация побочных продуктов металлургического производства (таких как доменный газ, коксовый газ, ферросплавный газ, конвертерный газ и др.) выполняется либо в паровых котлах утилизационных ТЭЦ с целью выработки электрической и/или тепловой энергии для покрытия собственных или городских нужд, либо в печах для получения дополнительной тепловой энергии для покрытия собственных нужд [1]. В работе [2] сотрудниками японского концерна Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS, до 2014 года известный как Mitsubishi Heavy Industries) предлагается технология сжигания доменного газа в смеси с коксовым газом в парогазовых установках (ПГУ). Также у концерна MHPS богатый опыт по внедрению в ряде стран [1] технологии сжигания доменного газа в ПГУ без обогащения коксовым или природным газом. Подобная технология сжигания низкокалорийных газов внедрена в парогазовой установке с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) Nakoso (Япония) [3]. В работе [3] проведена экономическая оценка эффективности ПГУ на доменном газе для конкретного металлургического предприятия. Оценка выявила снижение затрат на покупку электроэнергии и экономию коксового газа. Следовательно, перспективным становится переход с утилизационных ТЭЦ на ПГУ. Поэтому для разработки технологии сжигания доменного газа применительно к камере сгорания ПГУ необходимо более детально изучить физико-химические характеристики процесса горения доменного газа. Для этого в кафедре Тепловые электрические станции УрФУ на стадии изготовления находится экспериментальный стенд для изучения физико-химических характеристик процесса горения горючих газовых смесей, аналогичных по составу доменному газу и другим побочным продуктам металлургического производства, применительно к камере сгорания ПГУ.

В данной работе проведено численное моделирование рабочего участка экспериментального стенда с целью определения расчетных физико-химических характеристик процесса горения горючей газовой смеси, аналогичной по составу доменному газу.

Описание экспериментального стенда

На рисунке 1 представлен эскиз экспериментального стенда.

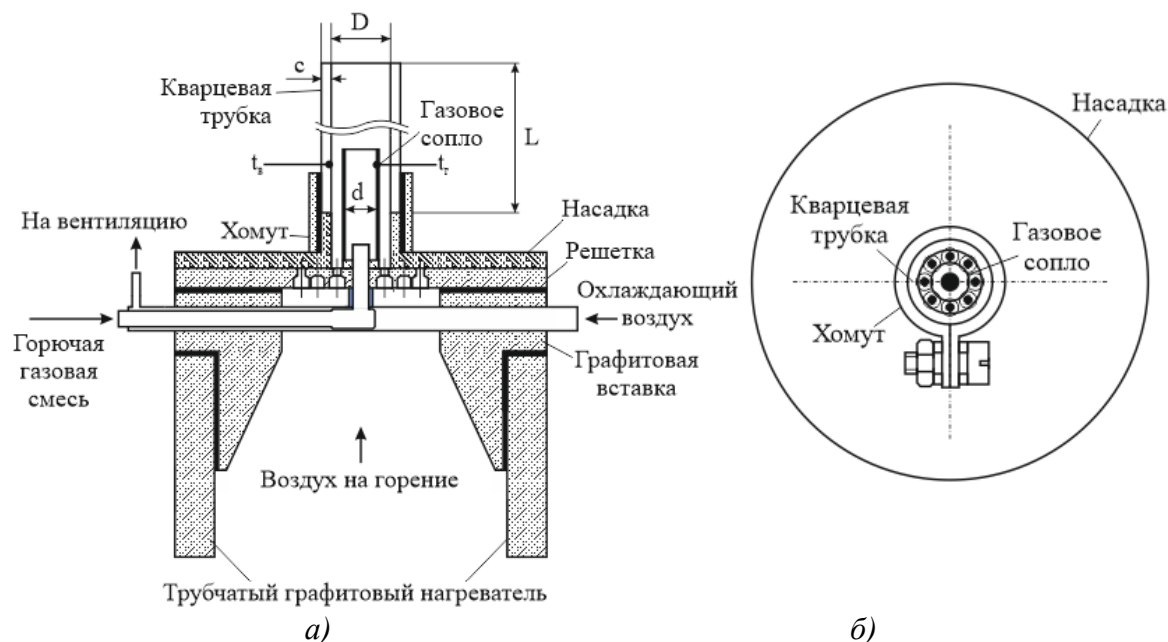


Рис. 1. Эскиз рабочего участка экспериментального стенда:

а – поперечный разрез; б – вид сверху

Окислитель (воздух) газовой смеси нагревается до 800 °С в трубчатом графитовом нагревателе. Поверх нагревателя крепится решетка, выполненная из нержавеющей стали, с 8 отверстиями для пропуска воздушного потока. Воздух на горение после нагревателя направляется в рабочий участок экспериментального стенда. Решетка способствует выпрямлению и равномерному распределению воздушного потока в рабочем участке. Рабочий участок экспериментального стенда выполнена из кварцевой трубки с внутренним диаметром 15 мм и толщиной стенок 2.5 мм. Горючая газовая смесь с температурой 30 °С подаётся в рабочий участок через газовое сопло с внутренним диаметром 8 мм и толщиной стенок 0.5 мм. Длина рабочего участка (L) меняется в зависимости от расхода подаваемых сред.

Экспериментальный стенд предназначен для исследования физико-химических характеристик ламинарного диффузионного факела. В зависимости от условий эксперимента температуры и расходы подаваемых сред варьируются в широком диапазоне. Температуры газовой смеси и воздуха измеряются микротермопарами t_g и t_b соответственно (рисунок 1а). Расходы подаваемых сред измеряются ротаметрами и регуляторами расхода газа (РРГ).

Численное моделирование

Численное моделирование экспериментального стенда проводилось в CFD-пакете. На рисунке 1б показано, что рабочий участок экспериментального стенда имеет осесимметричную форму. Поэтому, для сокращения длительности расчёта, модель можно разделить на восемь сегментов (в решетке 8 отверстий для пропуска воздуха) и провести численное моделирование только одного сегмента. Благодаря симметрии и ламинарному режиму течения сред в остальных сегментах характер протекания процесса горения будет аналогичным. Такой способ моделирования способствует не только сокращению длительности расчёта численной модели, но и значительно упрощает геометрическую форму модели.

Параметры горючей газовой смеси (ГГС) и окислителя (воздуха) в входном сечении рабочего участка приведены в таблице 1. В ходе моделирования длина рабочего участка (L) принята равным 100 мм.

Таблица 1

Входные параметры горючей газовой смеси и окислителя (воздуха)

Среда	Состав, масс. %					Температура, °С	Расход, 10 ⁷ м ³ /с	
	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O		Случай 1	Случай 2
ГГС	21	28	51	0	0	30	2.15	4.31
Воздух	0	0	76	23	1	800	1.55	3.09

Результаты моделирования

В таблице 2 приведены расчетные характеристики продуктов сгорания в выходном сечении рабочего участка при горении газовой смеси, аналогичной по составу доменному газу.

Таблица 2

Расчетные характеристики продуктов сгорания на выходном сечении рабочего участка

№	Среднемассовая температура*, К	Состав, масс. %				Скорость, см/с
		O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	
Случай 1	368.06	1.98	60.97	0.4	36.55	2.12
Случай 2	587.57	1.96	60.96	0.4	36.58	7

* В ходе моделирования теплоизоляция рабочего участка не учитывалась («не закрытая» кварцевая трубка, см. рисунок 1а).

На рисунке 2 представлены профили распределения концентрации СО и температуры в продольном сечении рабочего участка экспериментального стенда, полученные в результате численного моделирования.

Результаты моделирования показали, что длина факела в первом случае составляет 17 мм, во втором случае – 34 мм. Расчетная концентрация СО в выходном сечении для обоих случаев составляет порядка 54 ppm, что свидетельствует о достаточной полноте сгорания СО в лабораторных условиях.

Численное моделирование показало, что в первом случае:

- расчетная максимальная температура факела в рабочем участке составляет 1511.24К;
- расчетная средняя температура стенок кварцевой трубки составляет 610.22 К (при условии, что температура окружающего воздуха составляет 293.15 К).

Во втором случае:

- расчетная максимальная температура факела в рабочем участке составляет 1594.06К;
- расчетная средняя температура стенок кварцевой трубки составляет 690.52 К (при условии, что температура окружающего воздуха составляет 293.15 К).

Вывод

Расчетная длина факела в первом случае составляет 17 мм, во втором случае – 34 мм. Расчетная концентрация СО в выходном сечении для обоих случаев составляет порядка 54 ppm.

В обоих случаях расчетная температура стенок кварцевой трубки ниже температур деформации и размягчения кварцевого стекла [4, 5]. Это означает, что рабочий участок экспериментального стенда может быть выполнен из любой марки кварцевого стекла.

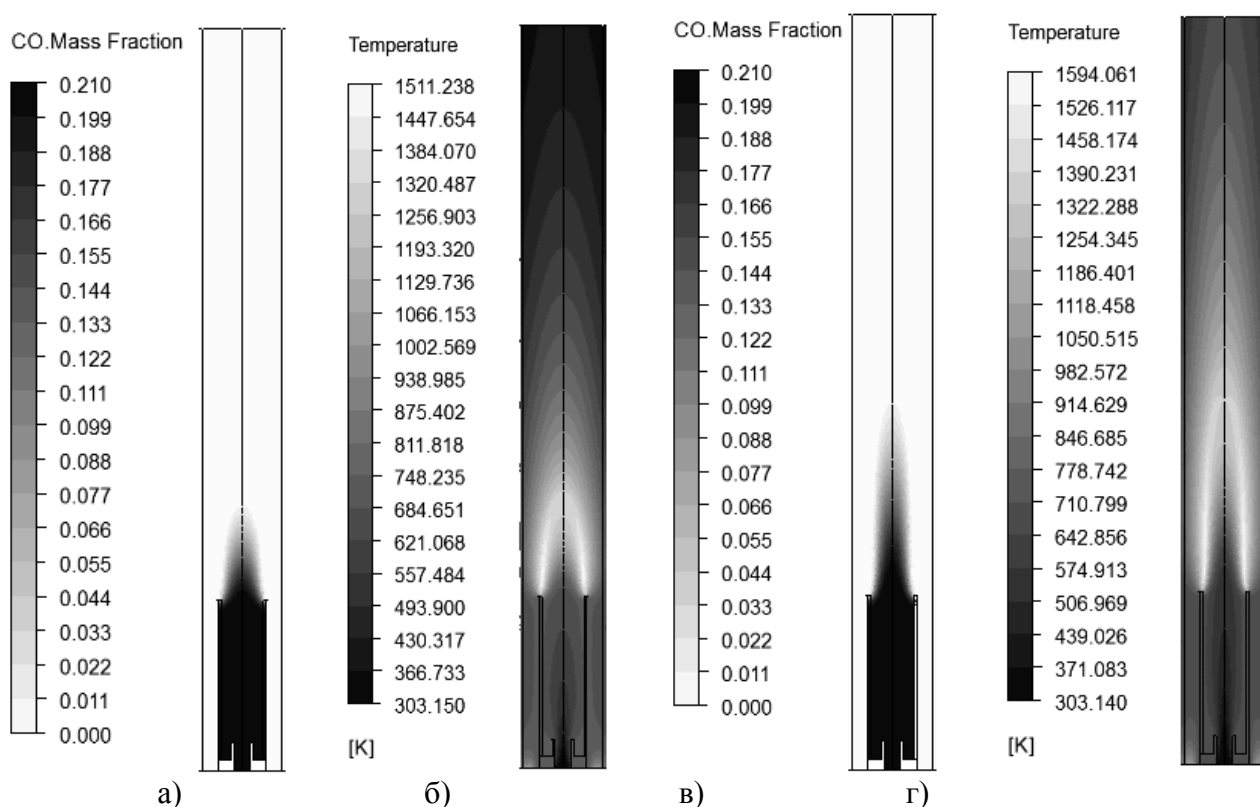


Рис. 2. Профили распределения концентрации СО и температуры в продольном сечении рабочего участка: а, б – для Случая 1; в, г – для Случая 2

Из рисунка 2 видно, что воздух в промежутке между входным сечением рабочего участка и зоной смешения с газовой смесью охлаждается в обоих случаях приблизительно на 400 К. Такое охлаждение обусловлено отсутствием теплоизоляции рабочего участка («не закрытая» кварцевая трубка).

В дальнейшем планируется проведение численного моделирования с учётом наличия теплоизоляции рабочего участка («закрытая» кварцевая трубка) экспериментального стенда. Также планируется исследование влияний изменений температур и расходов подаваемых сред на физико-химические характеристики диффузионного факела в вышеописанном экспериментальном стенде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00479 мол_а.

Список использованных источников

1. Повышение эффективности использования доменного газа на металлургических предприятиях России / Рыжков А.Ф., Левин Е.И., Филиппов П.С., Абаимов Н.А., Гордеев С.И. // Металлург. 2016. №1. С.26-34.
2. Komori T., Yamagami N., Hara H. Design for Blast Furnace Gas Firing Gas Turbine [Электронный ресурс]. URL: https://www.mhi.co.jp/power/news/sec1/pdf/2004_nov_04b.pdf (дата обращения: 12.04.2016).
3. Ryzhkov A.F., Levin E.I., Filippov P.S. Use of poor industrial gases for power generation in the combined cycle // Metallurgical and Mining Industry. 2015. №6. P.629-641.
4. ГОСТ 15177-70. Трубы из прозрачного кварцевого стекла для источников света и электровакуумных приборов. М. 1970.
5. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. – М. 1999.